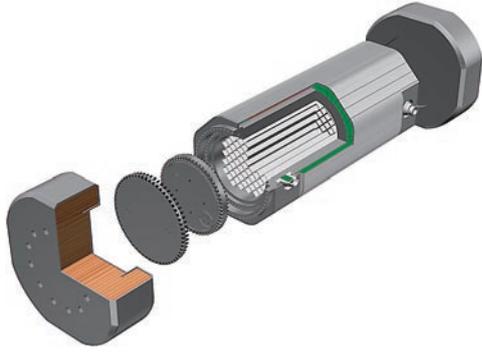


使用済燃料輸送貯蔵キャスクの開発

Development on Spent Nuclear Fuel Transport and Storage Cask



山本 知史*¹
Tomofumi Yamamoto

玉置 廣紀*²
Hiroki Tamaki

甫出 秀*³
Suguru Hode

松岡 寿浩*⁴
Toshihiro Matsuoka

上脇 好春*⁵
Yoshiharu Kamiwaki

北条 公伸*⁶
Kiminobu Hojo

国内外の使用済燃料中間貯蔵市場では、安全かつ経済的な輸送貯蔵キャスクが望まれている。このため、材料及び生産技術の開発を初め落下試験などの実証試験を実施するなど戦略的な製品開発を進めている。これまで、バスケット用アルミニウム合金、中性子遮へい材（レジン）、本体胴底付き一体鍛造法などの技術開発を行っており、また、IAEA 輸送規則に基づく実機スケールのキャスク落下試験などにより総合的に安全性を実証している。欧州向け MSF-57B、国内向け MSF-26P 輸送貯蔵キャスクなどはこれら技術の集積である。

1. はじめに

欧州の原子力発電では燃料の高燃焼度化が進んでおり、高発熱の使用済燃料を輸送貯蔵する高性能キャスク（容器）が求められている。また、国内では初の商用中間貯蔵施設（リサイクル燃料資源貯蔵施設）の建設が現実のものとなり、安全かつ経済的なキャスクが望まれている。

当社は、これら国内外の市場環境に対応するため、キャスクに使用する材料や生産技術について戦略的な開発を行ってきた。また、開発されたキャスクは、実機モデル及び縮小モデルを使用し、IAEA 輸送規則に

基づくキャスク落下試験などにより安全性を実証している。これら技術開発の集積が“MSF”シリーズ乾式使用済燃料輸送貯蔵兼用キャスク（以下“MSF キャスク”と呼ぶ）である。

ここでは、MSF キャスクの特長と、その技術開発について報告する。

2. MSF キャスクの概要

MSF キャスクは、国内外の原子力発電所から発生する使用済燃料を安全かつ経済的に中間貯蔵するために開発されたものである。キャスクは使用される国の法令及び基準、IAEA 輸送規則などの規則、サイト固有の設計条件など、輸送及び貯蔵両方の要件に適合するよう設計される。MSF キャスクの概要を図1に、主な仕様を表1に示す。また、特長を次のとおりまとめる。

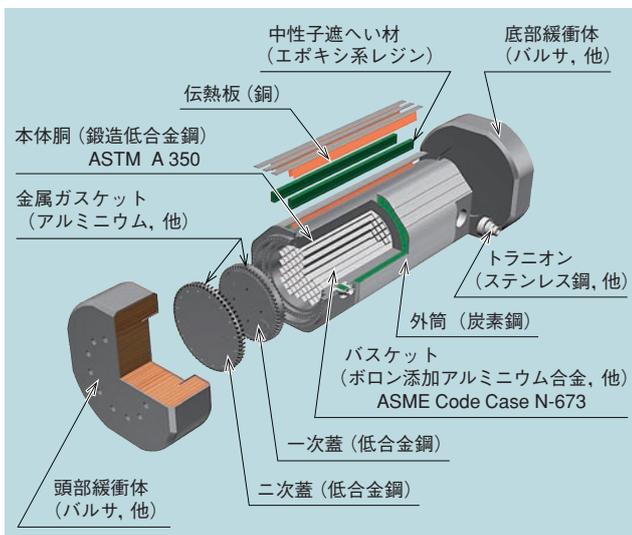


図1 MSF 輸送貯蔵キャスク概要
MSF-57 型を示す。

表1 MSF 輸送貯蔵キャスク仕様概要

	MSF-57 B	MSF-69 B	MSF-21 P	MSF-26 P
区 分	B (U)	B (U)	B (U)	B (M)
収納燃料	10×10BWR	10×10BWR	18×18PWR	17×17PWR
収納体数	57	69	21	26
冷却年数(年)	≥5	≥9	≥6	≥15
U-235濃縮度 (%)	5	3.7	4.5	4.2
最高焼却度 (GWd/t)	63	45	60	48
発熱量 (kW)	49	22	41	20
重 量 (t)	125/140*	126/141*	121/136*	119/140*
寸 法 (m)	φ 2.5×5.3	φ 2.5×5.3	φ 2.5×5.7	φ 2.6×5.1

*: 輸送用の緩衝体を含む重量

*¹ 原子力事業本部原子力技術センター原子力技術部原燃サイクル技術課主席

*² 神戸造船所原子燃料・バックエンド設計部次長

*³ 神戸造船所原子燃料・バックエンド設計部輸送・貯蔵システム設計課主席

*⁴ 神戸造船所原子燃料・バックエンド設計部輸送・貯蔵システム設計課

*⁵ 神戸造船所原子燃料・バックエンド設計部輸送・貯蔵システム設計課長

*⁶ 技術本部高砂研究所原子力システム研究室主席 工博

- 粉末冶金法によるボロン添加アルミニウム合金製バ
スケット《当社開発》
- 鍛造低合金鋼本体胴
(欧州向けは底付き一体鍛造《当社開発》)
- 金属ガスケット付二重蓋構造
(国内向けは三次蓋対応)
- エポキシ系レジン中性子遮へい材《当社開発》
- 高性能緩衝体《当社開発》
(輸送時にキャスク頭部及び底部に装着)

3. 技術開発プログラム

キャスクには①密封(放射性物質の閉じ込め)、②遮へい(放射線の遮へい)、③臨界防止(未臨界性の維持)、④除熱(崩壊熱の放散)、の4つの安全機能が要求される。また、これら安全機能を確保するため、キャスクは適切な構造強度を持つことが要求される。さらに中間貯蔵期間は40年~60年と想定されており、長期間に亘る安全機能の維持が求められている。

他方、経済性の観点から、キャスクに収納可能な燃料体数を増やす必要があり、このためには各安全機能の向上のほか、キャスク軽量化が必要である。また、製造や検査工数低減のためには、構造簡素化などの対策も有効である。

MSFキャスクの開発にあたり、上述の安全機能及び経済性向上の観点から課題を分析評価し、開発項目を定めた。安全機能とキャスク構造との関係を図2に、経済性を含む課題と開発項目との関係を表2に示す。開発課題の概要は次のとおりである。

(1) 密封

密封システムは、蓋、本体胴フランジ部及び金属ガスケットにより構成される。輸送及び貯蔵の要件下で密封システムの性能並びに構造強度を検証する必要がある。また、長期健全性の観点から、熱及び

腐食といった経年劣化への考慮が必要である。

(2) 遮へい

γ 線及び中性子線の遮へいは、本体胴の厚肉鍛造鋼とその周りに設けられた中性子遮へい材によって実現される。長期貯蔵の観点から、高分子材料である中性子遮へい材の経年劣化が課題となる。

(3) 臨界防止

臨界防止機能は、バスケットによる燃料の幾何学的配置維持とバスケットに含まれる中性子吸収材により実現される。このためバスケットには適切な強度・靱性を持ち、かつ中性子吸収材として必要量のボロンを含有する材料を使用する必要がある。

(4) 除熱

除熱機能は使用済燃料の崩壊熱をキャスク外表面から放散させることで実現される。良好な伝熱特性を得るため、バスケットはアルミニウム合金製とするのが合理的であり、併せて臨界防止機能を満足させる必要がある。

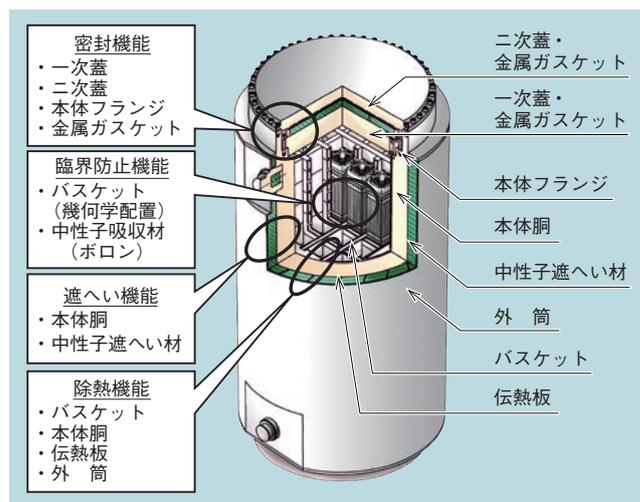
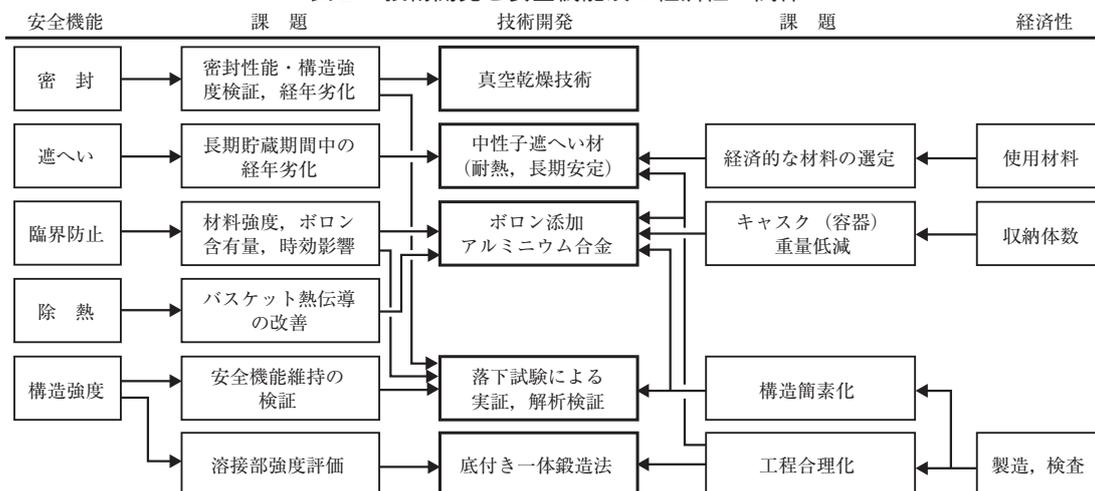


図2 キャスクの安全機能
キャスク構造と安全機能の関係を示す。

表2 技術開発と安全機能及び経済性の関係



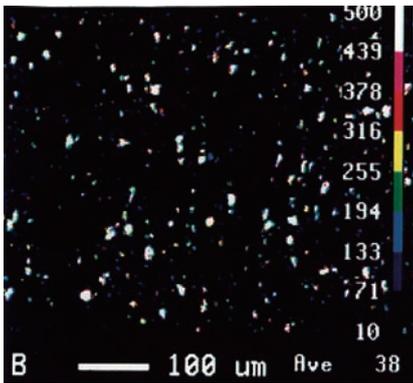


図3 ボロン分散状態 (ASME N-673 材)
電子線マイクロアナライザによるボロン分散状態を示す。白い点がボロン。

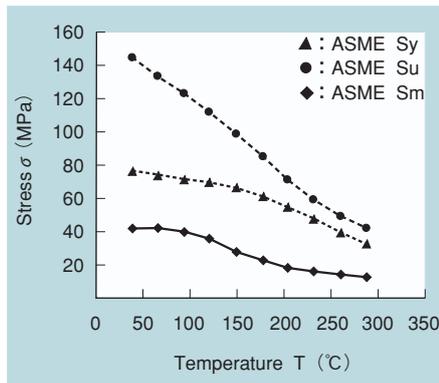


図4 温度-強度特性 (ASME N-673 材)

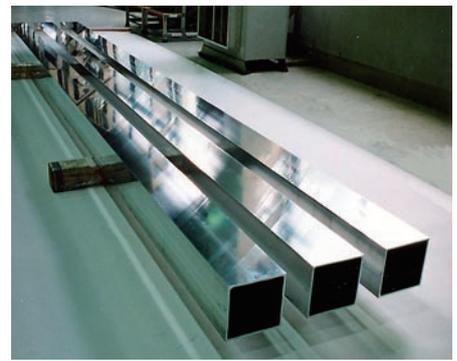


図5 ASME N-673 材 BWR バスケット
BWR 用角管バスケットセルを示す。

(5) 構造強度

キャスクは、輸送及び貯蔵の各設計事象において安全機能を維持するため、適切な構造強度を持つ必要がある。代表的な輸送要件である IAEA 輸送規則では、9 m 落下などの試験条件（設計事象）が定められており、これら試験条件において密封システムやバスケットなどの構造健全性について十分な検証が必要である。

(6) 経済性

キャスクの経済性向上には燃料収納体数の増加と共に、製造・検査工程の合理化が有効である。収納体数増加にはキャスク軽量化のみならず、各安全機能の向上も必要である。また、バスケット構造の簡素化は、加工・組立ての合理化につながる。本体胴の溶接部削減は、その検査だけでなく当該部の強度評価も不要にすることができる。

4. 技術開発

当社は 1960 年代からキャスク開発を進めてきており、MSF キャスクは、これまで蓄積してきた技術と戦略的開発プログラムの成果である。MSF キャスクに適用している技術開発のうち代表的なものを以下に説明する。

4.1 ボロン添加アルミニウム合金

バスケット材料は、キャスクの安全機能である臨界防止及び除熱性能と、軽量化や構造簡素化といった経済性向上のキイとなる技術である。このため、粉末冶金法によるボロン添加アルミニウム合金を開発した。この材料の特長は次のとおりである。

- 高温（約 300 °C 以下）での長期使用環境下でも時効（過時効）の影響はない。
- 溶製法ボロン添加アルミニウム合金に比べ靱性を確保しやすい。
- 熱伝導率は通常のアルミニウム合金と同等。

- ボロン含有率は 1.5 wt%～9 wt% (B₄C) で、均一分散している（図3参照）。
 - ASME Section III 炉心支持構造物として Code Case に登録済み (N-673)（図4参照）。
 - 押出成形により角管などの任意形状の成形が可能である（図5参照）。
- さらに、この技術を発展させてメカニカルアロイ法を適用し、高温環境での強度を大幅に改善したボロン添加アルミニウム合金を開発している。

4.2 中性子遮へい材

長期安定性やキャスク製作時の充てん等の取扱性を考慮し、中性子遮へい材“MREX”を自主開発した（図6参照）。

この材料の特長は次のとおりである。

- エポキシ系樹脂をベースとし、比重、水素含有量、B₄C 含有量などの材料仕様が既存製品と同等。
- 長期高温条件下の安定性（重量減損特性）が既存製品と同等。
- 社内試験で特性データを取得済み（図7参照）。
 - 5 000 Hr × 150 °C の長期耐熱試験
 - 中性子照射による劣化試験
 - 800 °C × 30 分燃焼試験（残存率 50% 以上を確認）
- 自動計量管理機能付き混練設備を自主開発し、原料

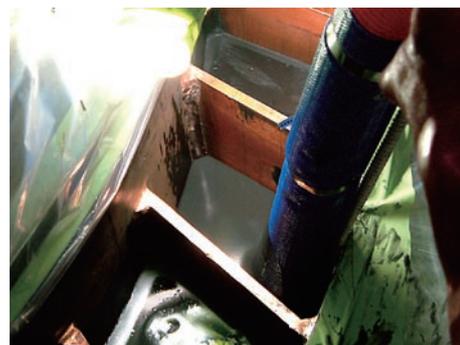


図6 中性子遮へい材“MREX”
キャスク本体胴-外筒間への充てん
施工を示す。

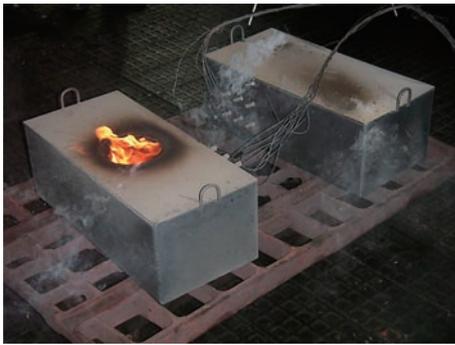


図7 中性子遮へい材耐火試験
800℃×30分の耐火試験後の自己消
火性の確認。

～施工のトレーサビリティに優れている。

- 実機輸送キャスクにも施工実績有り

この他、より長期高温条件下での安定性に優れた高性能中性子遮へい材も開発している。

4.3 キャスク本体胴鍛造技術

本体胴はキャスク安全機能を確保するため、適切な構造強度が必要とされる主要部材である。当社は、これまで原子力用圧力容器などの鍛造材利用技術を数多く蓄積してきており、これをベースとして“底付き一体鍛造法”を日本鑄鍛鋼(株)と共同開発した。これはキャスク本体胴をコップ状に鍛造する工法であり、工程の概要を図8に、本体胴の製作例を図9に示す。この工法の特長は次のとおりである。

- 胴部と底板の溶接、溶接検査(RT等)の削減
- 溶接部に対する破壊靱性評価が不要

また、キャスク本体胴材料には最低使用温度又は

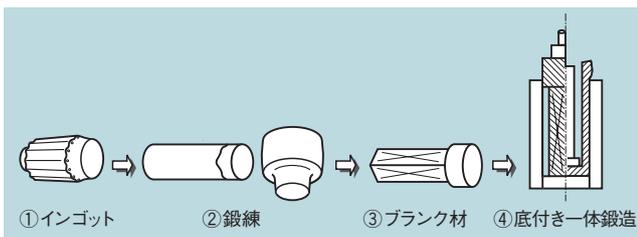


図8 底付き一体鍛造法の工程概要



図9 底付き一体鍛造法によるキャスク
本体胴製作

-40℃における低温靱性が要求される。このため、必要強度及び低温靱性を確保する製造管理技術も確立している。

4.4 その他の技術開発

中間貯蔵に使用されるキャスクは内部をヘリウム雰囲気とする乾式であり、発電所内での使用済燃料装荷後にキャスク内部水のドレンと乾燥を行う。この乾燥工程での課題には、燃料被覆管の制限温度を守るための乾燥要領の策定やキャスク内部の腐食を回避するための乾燥基準値の策定などが挙げられる。これらについても研究を進め、以下の技術を確立している。

- 真空乾燥時温度評価(燃料被覆管温度を含む)
- 密封シール部の腐食対策と乾燥基準の設定

5. 落下試験と構造評価

5.1 落下試験

キャスクの構造健全性を評価するためには、解析による評価と共に試験での実証と解析技術の検証が必要である。当社はIAEA輸送規則に準拠した10t級落下試験設備を保有しており、これまで数多くの落下試験を実施してきた(図10参照)。

また、欧州向けMSFキャスクについては、ドイツ許認可試験として実機スケール試験体などによる落下試験を実施しデータを蓄積している。

これらMSFキャスク開発に係る主要な落下試験の実績は次のとおりである。

- 1998～1999年：1/2.35落下試験(社内試験)
- 2003～2004年：1/2.35緩衝体性能評価試験(社内試験)
- 2004～2005年：1/1 & 1/2.5落下試験(ドイツBAMホルストバルデ試験施設にてドイツ輸送許認可の一部として実施)



図10 1/2.35落下試験体による9m落下試験
高砂研究所内落下試験場における社内試験。



図 11 1/1 スケール落下試験体
ドイツ BAM ホルストバルデ試験施設にて。

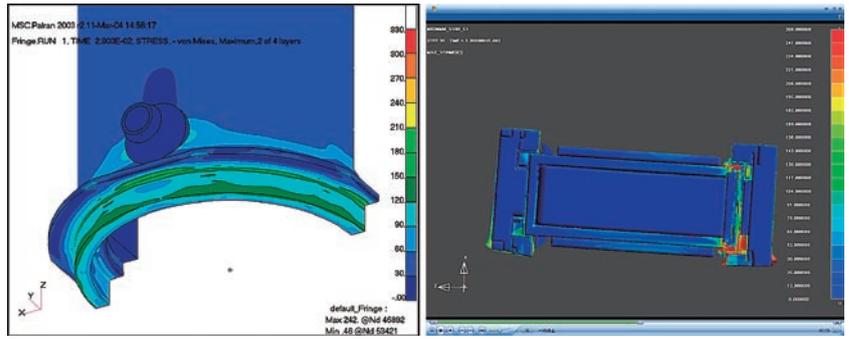


図 13 三次元動的構造解析コード“LS-DYNA”による解析例
9m 落下試験時のフランジ部応力解析例を示す。



図 12 1/1 スケール 9m 落下試験
ドイツ BAM ホルストバルデ試験施設
における輸送許認可試験。

ドイツ許認可試験として使用した落下試験体を図 11 に、落下試験の状況を図 12 に示す。

5. 2 動的構造評価技術

計算技術の発達によって、三次元動的構造解析によりキャスク落下時の挙動を評価することが比較的容易となった。この三次元解析ではキャスク構造をそのままモデル化し現実の挙動をシミュレートすることが可能であるが、以下に示す様にモデルや解析条件への配慮が必要である。

- キャスク構造の適切なモデル化と計算メッシュの設定
- 物性データ及び速度効果の適切な考慮
- 要素間の摩擦や間隙の適切な考慮
- 衝撃などの入力条件の適正化

これらは、試験を通じて検証（ベンチマーク）されるべきものであり、解析の前提や仮定については試験結果に基づく理論的な説明が必要である。当社は、前項に示すとおり数多くの落下試験を実施し、三次元動的構造解析コード“LS-DYNA”の適用に関する評価と検証を進めている（図 13 参照）。

6. ま と め

当社は使用済燃料の中間貯蔵キャスクについて、安全機能及び経済性の向上の両面から戦略的なアプローチにより技術開発を進めてきた。これら技術の集積が

MSF 輸送貯蔵キャスクである。

近年、海外のみならず国内でも燃料の高燃焼度化が進んでいるが、今後もこれら動向を踏まえ、安全性と経済性に優れた最適な製品を投入すべく先進の技術開発を進めていく方針である。

最後に、本報告に際し、ドイツ連邦材料試験研究所（BAM）ホルストバルデ試験施設にて撮影された写真を使用しており、BAM に謝意を表すものである。なお、本報告に示されるすべての見解は当社のものであり、BAM の見解ではない。また、ドイツ許認可に関するすべての試験結果は、ドイツ当局の審査対象であることに注意されたい。

参 考 文 献

- (1) Regulations for the Safe Transport of Radioactive Materials, IAEA Safety Requirements No. TS-R-1
- (2) S.Kuri, Y.Funakoshi, et al., Development of Manufacturing Technology on Body-Base Monolithic Cask Forging, 15th International Forgemasters Meeting (2003)
- (3) T.Yamamoto, et al., A Perspective on an R&D Program for Spent Fuel Interim Storage Cask System, PATRAM2004 (2004)
- (4) S.Kuri, H.Tamaki, et al., Development of Transport and Storage Cask for High Burn-up Spent Fuel of German Nuclear Power Plant, PATRAM2004 (2004)
- (5) T.Yamamoto, et al., Results of Full-Scale Drop Tests for "MSF" Spent Fuel Transport and Storage Cask in Germany, INMM Spent Fuel Management Seminar (2006)



山本知史



玉置廣紀



甫出秀



松岡寿浩



上脇好春



北条公伸